

不同浓度粉末活性炭及其施用方式对土壤入渗的影响

赵 楚^{1,3}, 盛茂银^{1,2}

(1.贵州师范大学喀斯特研究院,贵阳 550001;2.国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,
贵阳 550001;3.贵州省喀斯特石漠化防治与衍生产业工程实验室,贵阳 550001)

摘要:以喀斯特地区典型的石灰土为研究对象,采用室内一维定水头法土柱模拟试验手段,以 4 种活性炭浓度(0,0.005,0.01,0.02 g/g)及 2 种混合施用方式(0—10,10—20 cm)、3 种成层施用方式(6—8,10—12,16—18 cm)为变量,观测土壤湿润锋推移及累积入渗量的动态变化过程,利用线性关系式和 van Genuchten 经验公式分别模拟湿润锋推移情况及水分特征曲线经验公式,测量不同土层的质量含水量来研究活性炭粉对土壤入渗过程的影响。结果表明:(1)相同入渗时间内,较高浓度(0.02 g/g)和较浅层的施用方式(0—10 cm 混施和 6—8 cm 层施)对比其他试验组,在土柱湿润锋推移速度的减缓方面表现最优;(2)在前期($t=80$ min),入渗受活性炭粉末抑制的程度与其浓度呈正相关,但高浓度的碳粉同时会减缓湿润锋推移速度,故最终入渗量($t=340$ min)受其浓度影响较小,同时土壤入渗受活性炭粉末理化性质的影响,层状铺设入渗后期呈现斜率增大的趋势;(3)van Genuchten 经验公式及 RETC 软件对土壤入渗过程的模拟皆表明活性炭粉末施入土壤后,其浓度与土壤吸收水分的能力呈正相关,与土壤释水能力呈负相关;(4)活性炭粉末使得土壤田间持水量与凋萎系数均有所提升,活性炭粉末施用浓度越高,田间持水量越大。(5)层施状态下的活性炭粉末能增加所在土层的质量含水量,为对于其他深度土层的含水量则影响不大。

关键词: 活性炭粉末; 土柱模拟试验; 水分特征曲线; 入渗

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)05-0091-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.014

Effects of Different Concentrations of Powdered Activated Carbon and Its Application Method on Soil Infiltration

ZHAO Chu^{1,3}, SHENG Maoyin^{1,2}

(1.Institute of Karst Research, Guizhou Normal University, Guiyang 550001;

2.National Engineering Research Center for Karst Rocky Desertification Control, Guiyang 550001;

3.Guizhou Engineering Laboratory for Karst Rocky Desertification Control and Derivative Industry, Guiyang 550001)

Abstract: Taking the typical lime soil in Karst area as the research object, the indoor one-dimensional fixed head method was used to simulate the soil column. Four activated carbon concentrations (0, 0.005, 0.01 and 0.02 g/g), two mixed application methods (0—10, 10—20 cm) and three layered application methods (6—8, 10—12 and 16—18 cm) were used as variables. To observe the dynamic process of soil wetting front movement and cumulative infiltration, the linear relationship and van Genuchten empirical formula were used to simulate the movement of wetting front and the empirical formula of water characteristic curve, respectively, and the mass water contents of different soil layers were measured to study the effect of activated carbon powder on soil infiltration process. The results showed that: (1) In the same infiltration time, compared with other experimental groups, the higher concentration (0.02 g/g) and the shallow application mode (0—10 and 6—8 cm) were better in slowing down the moving speed of soil column wetting front. (2) At the early stage ($t < 80$ min), the inhibition degree of infiltration by activated carbon powder was positively correlated with its concentration, but the high concentration of carbon powder could slow down the movement rate of

收稿日期:2019-04-19

资助项目:贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5726号);贵州省科学技术基金重点项目(黔科合基础[2016]1414);贵州省普通高等学校科技拔尖人才支持计划(黔教教 KY 字[2016]064);贵州省优秀青年科技人才支持计划项目(黔科合平台人才[2017]5638);贵州师范大学研究生创新基金项目(YC[2018]043)

第一作者:赵楚(1996—),男,硕士研究生,主要从事岩溶生态建设与区域经济研究。E-mail:zcslsx@163.com

通信作者:盛茂银(1980—),男,博士,教授,主要从事特色植物利用与岩溶生态研究。E-mail:shmoy@163.com

wetting front at the same time. Therefore, the final infiltration amount ($t < 340$ min) was less affected by its concentration, and affected by the physical and chemical properties of activated carbon powder. The slope increased at the later stage of layered laying infiltration. (3) The simulation of soil infiltration parameters by van Genuchten empirical formula and RETC software showed that the concentration of activated carbon powder was positively correlated with the ability of soil to absorb water, and it was negatively correlated with soil water release capacity. (4) Activated carbon powder increased soil field water holding capacity and wilting coefficient, and the higher the concentration of activated carbon powder, the greater the field water holding capacity. (5) Under the condition of layer application, the activated carbon powder could increase the mass water content of the soil layer, but had little effect on the water content of other deep soil layers.

Keywords: activated carbon powder; soil column simulation experiment; water characteristic curve; infiltration

活性炭(activated carbon)指含碳材料经活化、碳化工艺后而形成的一类以碳单质为主掺杂少量灰分的多孔性混合材料,其应用历史可追溯至罗马帝国时期人们利用木炭去除水中杂质^[1-2]。其原材料为富含碳的有机物质,故其化学性质稳定,机械强度高,在高温、腐蚀条件下能保持良好性能,且不溶于水和有机溶剂。由于在制作中经历了活化过程,这使得其本身的孔隙结构极为发达,巨大的比表面积和较小的容重使其具有良好的物理吸附能力,同时其表面的化学官能团、杂原子和化合物赋予其良好的化学吸附性能^[3]。将活性炭施入土壤中能够减小土壤容重,增加土壤孔隙度,减少水分蒸发,从而改善土壤质地;其表面的羟基、羧基、酚基等含氧络合物能够对重金属产生专性吸附,含氧官能团中酸、碱化合物也能吸附部分极性、非极性化合物,达到提高环境质量的目的;其含氧官能团同时能够吸附琼脂杂质、酸类及部分维生素,间接促进植物生长。基于上述特征,目前活性炭在生态领域的研究主要集中在土壤及水体重金属吸附、植物生长催化、有毒气体净化等方面,但活性炭的小孔隙结构以及表面的羧酸基、羟基等亲水基团对水分子会产生吸附作用,这使得其在水土保持方面也具有一定的应用潜力^[4-5]。作为其同质异构体的生物炭、纳米碳作为添加剂在改善土壤团粒结构、改变壤中流动力特征、减少土壤侵蚀等方面都取得了相应的研究成果,但生物炭对有机物的吸附能力强于活性炭,作为土壤改良剂极易携带附着物随径流迁移,造成水体污染^[6]。纳米碳本身造价高昂,其毒理性研究尚不明确,对环境有潜在危害,故其应用同样存在限制^[7],因而成本低、环境影响小^[6,8]的活性炭粉末亟需开展水土保持方面研究。

水土流失是我国生态系统面临的三大威胁之一,这种在自然和人为综合作用下,引起土层流失并伴随地力衰退的现象使得人地矛盾益显加剧^[9]。贵州是全球水土流失最为严重的地区之一,缺少平原地形的

支撑,坡耕地成为该区农业发展的重要物质载体,且受石漠化的影响,坡度陡、土层薄、持水性差成为其主要特点,因而省域内 246.23 万 hm^2 的坡耕地全部为水土流失区域^[10]。近年来,随着材料科学的发展,藉由碳质材料施入土壤,通过改善其理化性质以缓解侵蚀的研究成为热点,Doan 等^[11]将浓度为 700 g/kg 的生物炭铺设于 10 cm 表土层,发现其可以有效降低自然降雨对土壤的侵蚀;吴媛媛等^[12]将不同含量(0%,1%,3%,5%,7%)的生物炭与土壤混施铺设于钢槽中,通过模拟降雨发现土壤抗侵蚀能力与生物炭施用量成正比;薛文强等^[13]将 0.1%,0.3%,0.5%,0.7%,1%浓度的纳米碳在土壤中进行层施,发现相对较高浓度的纳米碳具有明显的减渗作用。总体而言,耕作措施作为水土流失治理的重要方式之一,以其易操作、成本低、效果好等特点在农业领域应用普遍^[14],目前将碳质土壤改良剂与不同耕作措施相结合的研究尚存在欠缺。因此,本文以喀斯特地区典型森林土壤作为研究对象,在室内采用定水头法一维土柱模拟试验方法,通过设计不同土层深度、不同活性炭浓度的层施、混施对照组来探讨活性炭对土壤水分入渗特征及其分布的影响,以期为进一步利用活性炭进行水土保持提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土样

本试验就活性炭混施层、层施层对土壤入渗动力特征及水分分布情况开展研究,供试土壤为贵州喀斯特地区典型石灰土,采自贵州贵阳相宝山农地,该区海拔 1 000~1 200 m,年均气温为 15.4 $^{\circ}\text{C}$,年降水量 1 300 mm,年平均相对湿度 76%,是典型的亚热带湿润气候。土壤于 2018 年 11 月按 0—20 cm 自然剖面分组取回,去除凋落物、树根、碎石等杂质后自然风干,经研磨过 2 mm 网筛存置。活性炭粉末采购自天津市登科化学试剂有限公司,粒径为 75 μm 。土壤粒

径表征利用荷兰 Ambivalue 生产的土壤粒径分析仪,其黏粒含量为 6.45%,粉粒含量为 60.59%,砂粒含量为 32.96%。

1.2 试验设计

试供土壤以 1.21 g/cm^3 的容重填装至高 40 cm,壁厚 0.5 cm,内径 3.5 cm 的玻璃圆柱中,为防止土粒流失以阻塞出水口,在玻璃圆柱底部垫上纱布及滤纸,管内壁涂抹 1 层凡士林以减少管壁摩擦阻力对入渗的影响,土柱装填分 4 层,每层 5 cm,依次填入玻璃土柱,并搅拌均匀,同时在层与层之间进行刮毛,土柱装填好后在土层顶部铺设 1 层滤纸,避免水流冲刷破坏土壤上表面。

试验采用一维垂直定水头法测定土壤入渗过程,供水装置为内径 6 cm,高 30 cm 的马氏瓶,水头高度保持在 3.5 cm,供水开始后按先密后疏的原则记录湿润锋推移深度及马氏瓶中水面刻度,当湿润锋移动至土柱底层 20 cm 处时,关闭进水阀门,并于 90 min 后用长 30 cm,内径 2 cm 的取土钻从表土层向下每层 4 cm 取土,105℃烘至恒重,以测定不同土层的含水率。

将原土按 1.21 g/cm^3 的容重装入环刀,按相应浓度等级(0.005,0.01,0.02 g/g)施入活性炭,与土壤均匀混合,置入蒸馏水中,使其自下而上充分饱和,72 h 之后取部分试验样品放入离心管中,利用高速冷冻离心机获取不同土样的水分特征曲线,离心温度控制 15℃,转速设置为 1 000~10 000 r/min,间隔为 1 000 r/min,待离心结束后,将土样置入烘箱中烘至恒重,通过换算求取不同吸力下的土壤体积含水量。

为探求活性炭用于水土保持的最适用量及最佳放置方式,试验设置活性炭 3 个浓度梯度,并采用 A1:0—10 cm 混施,A2:10—20 cm 混施,B1:6—8 cm 层施,B2:10—12 cm 层施,B3:16—18 cm 层施 5 种施用方式,以不添加活性炭的处理 CK 为对照组,试验共计 16 个土柱,每组重复 3 次。

1.3 数据处理

试验中数据采用 2 次测验的平均值,运用 Microsoft Excel 2007、SPSS 22.0 软件进行各指标的特征值统计及回归方程的确定,RETC 软件拟合土壤水分特征曲线并求取经验参数,制图由 Origin 9.5 软件完成。

采用能够较好描述土壤吸湿过程并能配合大部分土壤水分特征曲线形状的 van Genuchten 经验公式^[15]:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_b - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^m$$

式中: θ 为土壤饱和含水量(cm^3/cm^3); θ_b 为饱和土

壤含水量(cm^3/cm^3); θ_r 为滞留土壤含水量(cm^3/cm^3); h 为土壤水吸力(cm); a 为进气吸力相关的参数; n 和 m 是形状系数,其中, $m = 1 - 1/n$ 。

2 结果与分析

2.1 粉末活性炭施用方式及浓度对湿润锋推移的影响

由图 1 可知,从总体效果来看,各试验组中湿润锋都随时间增长呈现出稳定的推移状态,但由于存在试验变量(活性炭粉末浓度与施用方式)的原因,各试验组的湿润锋推移情况同时也存在明显的差异。

0—10 cm 混施活性炭在 $t < 200 \text{ min}$ 时,0.02 g/g 用量组与 0.005,0.01 g/g 用量组之间的湿润锋推移深度分别存在显著差异性($p < 0.05$),说明较大浓度的活性炭在混施情况下对水分入渗同样有着较强的抑制效果,在活性炭粉末浓度由低到高的情况下,3 组土柱湿润锋深度与裸土相比分别低 7.1,8.0,12.4 cm($t = 80 \text{ min}$)。将活性炭粉末放置在 10—20 cm 土层中,当裸土湿润锋推移至 20 cm 处时,0.005,0.01,0.02 g/g 活性炭施用组湿润锋深度较其减少 16%,21%,32%,且 0.02 g/g 浓度活性炭粉末完成入渗时间分别较 0.005,0.01 g/g 浓度长 220,200 min。比较 2 种混施的情况,0—10 cm 混施对土壤入渗的抑制效果更为明显,粒径较小的活性炭粉末填充了土壤孔隙,使得水分运移的通道更加复杂,延缓了湿润锋推移的进度,而水分经过 10—20 cm 混施层时已经拥有较大的基质势和重力势,下渗抑制效果相对减弱。

从层施情况来看,不同深度层施下湿润锋推移至土柱底部的时间由短至长与活性炭粉末浓度施用量呈正相关,即 0.005,0.01,0.02 g/g 用量,但除 0.02 g/g 浓度外,其余施用量对湿润锋速度的减缓效果并不明显。5—8 cm 层施中,0.005 g/g 用量的土柱湿润锋最先到达 20 cm 深度,以此时间为节点考察 3 组用量之间湿润锋推移深度的差别,发现 0.005 g/g 用量与 0.02 g/g 用量之间存在显著差异($p < 0.05$),而其余用量组之间均不存在显著差异($p > 0.05$),当 $t = 80 \text{ min}$ 时,裸土的湿润锋推进深度分别高 0.005 g/g 用量 5.5%,0.01 g/g 用量 12%,0.02 g/g 用量 29%,且 0.02 g/g 用量在湿润锋到达 6—8 cm 其速率明显下降,说明该浓度下活性炭在此深度施用对水分入渗有良好的抑制效果。这是由于当下渗水流到达土层与混合层的临界面时,孔隙结构发达的活性炭增强了混合层的进水吸力,当水分的基质势足够大时才能够渗透进混合层^[16]。在穿透混合层的过程中,一方面粒径较小的活性炭粉末使得混合层的孔隙更加复杂;另

一方面混合层对水分的吸力更强,水分需要增加一定程度才可以继续下渗。

在层施深度为 10—12 cm 情况下,裸土湿润锋推移至土柱之前,0.005,0.01,0.02 g/g 用量处理之间不存在显著差异($p>0.05$),在 $t=80\text{ min}$ 时,其湿润锋运移深度较裸土分别降低 8.0%,19.5%,26.0%;当湿润锋推移至 10—12 cm 时,除裸土外,其余土柱的湿润锋推移速率均呈现先下降后上升的现象,在 $t=80\text{ min}$ 时,0.005,0.01 g/g 用量组的湿润锋推移速率呈现小幅度的上升,而 0.02 g/g 用量组湿润锋推移速率保持不变,这可能是活性碳粉发达的中孔结构,表面含有的亲水基团及颗粒间较大的毛细管力对水分子产生吸附效果,随后铺设量较小的活性炭混合层饱和度上升,入渗抑制效果减弱,而 0.02 g/g 用量组混合层饱和度较小,故仍对入渗过程产生良好的抑制效果。

对比 16—18 cm 层施的情况, $t<80\text{ min}$ 时,3 组用量之间不存在显著差异($p>0.05$),当 $t=80\text{ min}$ 时,0.005,0.01,0.02 g/g 用量处理组较裸土湿润锋深度分别降低 5.0%,12.5%和 17.0%;当湿润锋穿透混合层后,0.005,0.01 g/g 用量组湿润锋在 40 min 内先后到达土柱底部,而 0.02 g/g 用量组则推迟至 240 min。

为进一步探究活性炭施用浓度及方式对入渗过程的影响,同时考虑到活性炭粉末的施用会在土柱中形成非均质的夹层,以原土和活性炭混合层接触面为界,采用 SPSS 软件基于线性关系式 $z=dx+b$ 分段对湿润锋推移深度随时间的变化关系进行回归拟合。其中 R^2 值范围在 0.95~1.00,表明拟合结果较好,具有较高的置信度。拟合结果见表 1,其中, d 表示湿润锋在土层第 1 层的平均移动速率, C_1 表示湿润锋在第 2 层与第 1 层土层运移的平均速率的比值, C_2 表示湿润锋在第 3 层与第 2 层土层运移的平均速率的比值。对比表中 CK、A1、A2 参数可知,在混施方式中,随着活性炭粉末施用浓度的提升,相应土层中湿润锋推移速率减缓的效果就越明显。A1 中上层活性炭粉末(0.005,0.01,0.02 g/g)的施用可以减缓湿润锋在下层原土中的移动,使其速率分别降至 0.06,0.05,0.04 cm/min,其大小与活性炭粉末施用浓度仍呈负相关。在 B1、B2 与 B3 层施组中,除呈现与混施层相同的规律外,还存在湿润锋推移在第 3 土层斜率增大的趋势,该现象发生于:(1)0.02 g/g 活性炭粉末施用的 B1、B2 组;(2)0.005,0.01,0.02 g/g 活性炭粉末施用的 B3 组。上述现象将在讨论中进一步分析原因。

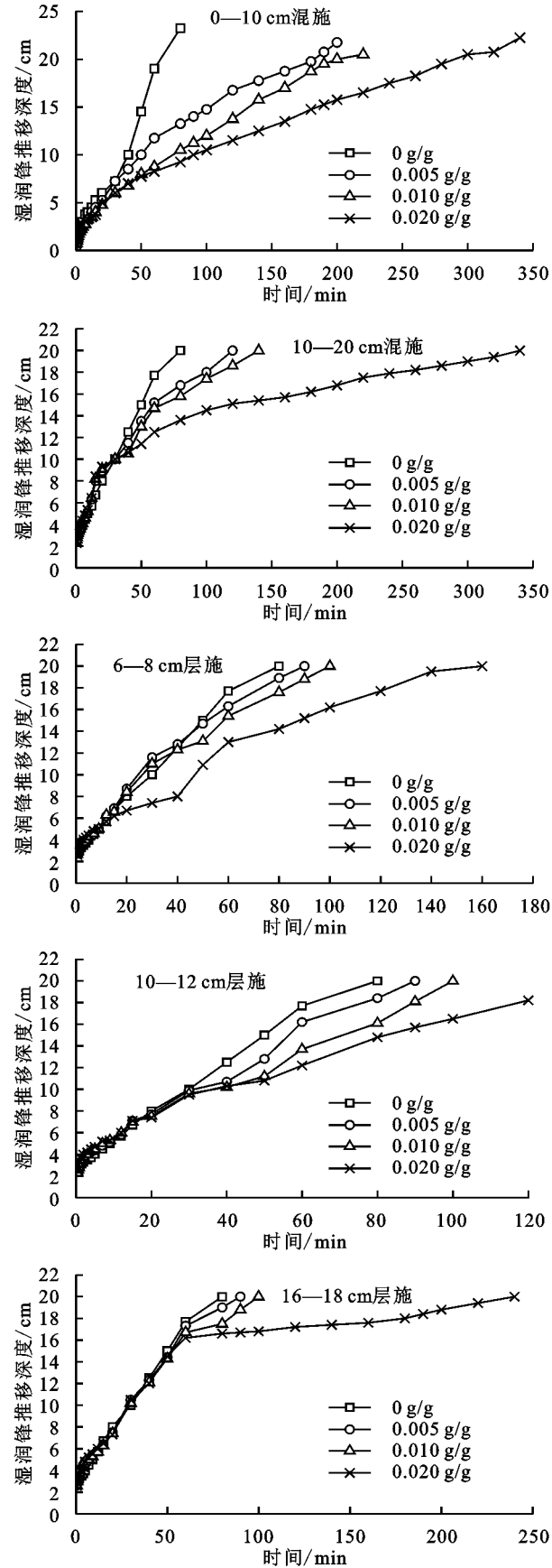


图 1 不同浓度粉末活性炭及其施用方式对湿润锋推移的影响

2.2 纳米碳施用方式及浓度对累积入渗量的影响

累积入渗量是反映土壤入渗能力的重要指标,适合描述土壤入渗未达到稳定状态时的过程。不同施

用量及施用方式下水分随时间推移的累积入渗情况见图 2。当裸土湿润锋推移至 20 cm($t=80$ min)时, 0—10 cm 混施下 3 种浓度处理的累积入渗量由低至高为:0.02 g/g 用量、0.01 g/g 用量、0.005 g/g 用量、裸土,且累积入渗量分别较裸土少 5.6,5.1,4.0 cm,但三者最终累积入渗量相差并不明显($p>0.05$);观察 10—20 cm 活性炭粉混施组的累积入渗情况,累积入渗量依旧与碳粉施用的浓度呈负相关,在 $t=80$ min 时累积入渗量 0.005,0.01,0.02 g/g 用量较 0—10 cm 混施组对应用量分别多 2.2,0.9,0.6 cm,这与湿润锋推进情况保持一致,进一步证明了在入渗时间相同的情况下,0—10 cm 混施方式对水分下渗的抑制效果更优,但比较其最终入渗量,由于 A1 组完成入渗的时间更长,使得其在最终累积入渗量上略微高于 B1 组。在活性炭粉末的微孔结构、巨大比表面赋予的表面能及部分极性官能团的共同作用下^[17],水分进入混合部分被吸收的概率更高,也使得土壤的有效孔隙被水分充斥而不断减少,故下渗速度的减缓使得水分被更充分的吸收饱和。

表 1 不同处理层湿润锋随时间变化的平均斜率比较				
试验组	活性炭浓度/ (g · g ⁻¹)	d / (cm · min ⁻¹)	C_1	C_2
CK	0	0.23		
	0.005	0.18	0.33	
A1	0.01	0.16	0.35	
	0.02	0.07	0.58	
	0.005	0.22	0.41	
A2	0.01	0.24	0.35	
	0.02	0.23	0.12	
	0.005	0.25	0.94	0.67
B1	0.01	0.24	0.89	0.61
	0.02	0.25	0.28	1.15
	0.005	0.25	0.85	0.59
B2	0.01	0.24	0.74	0.69
	0.02	0.23	0.41	0.99
	0.005	0.23	0.37	1.18
B3	0.01	0.23	0.29	1.36
	0.02	0.23	0.06	2.29

对层施处理下各组的累积入渗量进行比较,当水流入渗至裸土土柱底部($t=80$ min)时,5—8,10—12,16—18 cm 层施的累积入渗量多少与活性炭粉的浓度都呈负相关,其中 0.02 g/g 浓度的活性炭粉末对累积入渗量的抑制表现的极为显著($p<0.05$),但比较最终入渗量($t=340$ min)时,同一深度间不同浓度以及不同深度的同一浓度处理量都不存在显著差

异($p>0.05$)。6—8 cm 层施组中,0.005,0.01,0.02 g/g 用量处理下的累积入渗量在前期($t=90$ min)较裸土分别少 31.2%,35.5%及 41.9%,而最终累积入渗量分别较裸土少 2.3,1.3,0.8 cm。当活性炭粉末铺设至 10—12 cm 土层时,0.005 g/g 用量组与裸土同时完成入渗,而 0.01,0.02 g/g 用量组的累积入渗量在前期较裸土分别少 3.1,3.2 cm,而在入渗后期较裸土少 1.3,1.0 cm。在 16—18 cm 层施条件下 0.005,0.01,0.02 g/g 用量组累积入渗量在前期($t=90$ min)较裸土分别少 17.2%,29%,54.8%,而到了后期比率则降至 14%,9.8%,6.5%。

比较活性炭粉末 2 种铺设方式,在相同的入渗时间内,0—10 cm 混施对累积入渗量的抑制效果优于 10—20 cm 混施,6—8 cm 层施对累积入渗量的抑制效果优于 10—12,16—18 cm 层施,这可能是由于土碳混合层界面的有效孔隙度及毛管连通性都不及原土层,对入渗产生抑制,而较上层活性炭粉末的铺设使得初始入渗率的降低幅度较大,而对于土壤中层入渗速率的降低幅度相对较小所致。上述结果表明,活性炭粉末施入土壤中能够有效阻碍水分入渗,但浓度较高的活性炭粉末会较大程度地推迟入渗结束的时间,使得最终累积入渗量与裸土相比差距不大,故在实际运用中需综合考虑最终入渗量和湿润锋减缓的结果,选择浓度适中的活性炭粉末作为土壤改良剂。

2.3 不同浓度纳米碳混施的土壤水分特征曲线及模型参数

为进一步探究活性炭粉末混施对土壤持水性的影响,利用离心机测取不同浓度活性炭粉末用量下的土壤水分特征曲线。由图 3 可知,在经历过充分饱和(72 h)后,0.02 g/g 浓度处理的土壤混施组,其含水量明显高于裸土、0.005 g/g 及 0.01 g/g 组。

同时,相比较于裸土,0.005,0.01,0.02 g/g 活性炭用量组在相同离心力下表现出更高的体积含水量,且随活性炭粉末施入浓度的提高,土壤体积分含水量的阈值不断上升。在吸力由 8.4 kPa 增至 33.5 kPa 时,浓度由低至高 3 种活性炭粉末作用下土壤的体积分含水量分别削减 7.7%,8.7%,9.3%,而低吸力下土壤水主要是从大孔隙中排出;在吸力由 679.1 kPa 增至 838.5 kPa 时,0.005,0.01,0.02 g/g 活性炭用量下的土壤体积分含水量分别削减 2.2%,3.6%,1.8%,在高吸力作用下,土壤中只有小孔隙能够持留水分。说明活性炭以混施的方式加入土壤表现出良好的吸水性和持水性,不仅能够有效提高土壤的饱和含水量,同

时也增强了土壤对水分子的吸力,土壤持水性能随之得到优化。

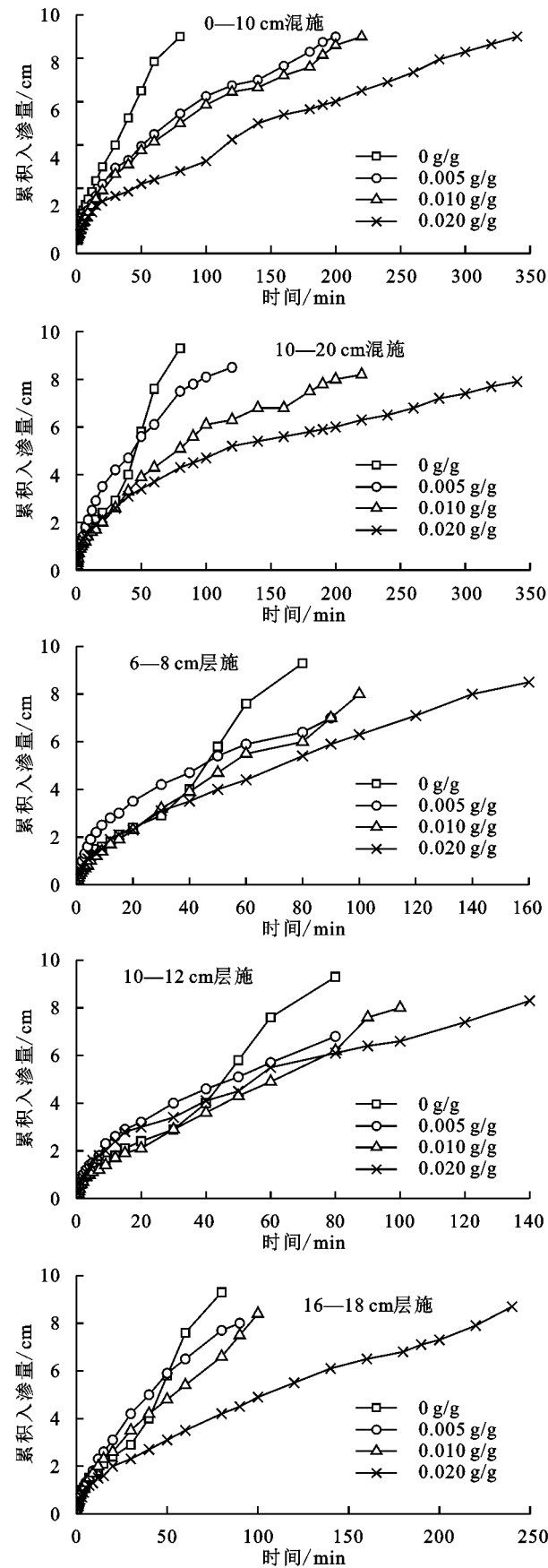


图2 不同浓度粉末活性炭及其施用方式对累积入渗量的影响

一方面,按照美国农业部制土壤粒径分级标准,平

均粒径为 75 μm 的活性炭粉末加入土壤中,相当于增加了土壤中极细砂粒的比例,这使得土壤中的孔隙数量得到提高,土壤的质地得到改善,对于水分的吸收量更高;另一方面,活性炭粉末与土壤充分接触,使得土壤运移通道的复杂度提高,减少有效孔隙度,同时活性炭粉末极大的表面能以及表面的部分官能团对于水分子团有一定的吸持能力,使得活性炭粉末对土壤持水性能的改善具有重要意义。

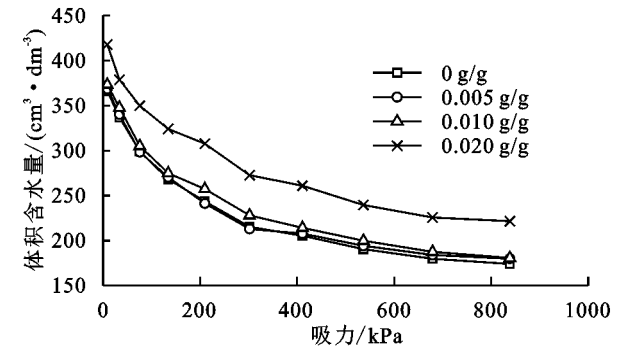


图3 活性炭粉末浓度对土壤水分特征曲线的影响

为进一步探究活性炭粉末混施条件下土壤水分吸收、释放相关运动参数的影响,利用 RETC 软件对 van Genuchten 经验公式中的相关参数进行拟合。由表 3 可知,随着活性炭浓度的提高,混施土壤的饱和含水量也随之提高,进一步验证了活性炭粉末能提高土壤的吸水性能;形状参数 n 一定程度上可用来描述水分特征曲线的变率,其随活性炭浓度的增高而减小; a 表征土壤的进气吸力,随活性炭浓度升高而增大,这表明活性炭粉末的施用使得土壤吸水力上升,释水率下降,且浓度越高,变化越大。

表 3 基于 RETC 的 van Genuchten 公式参数拟合			
活性炭粉末浓度/ ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	θ_b / ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	a	n
0	0.3708	0.2346	1.6873
0.005	0.3732	0.3423	1.4965
0.01	0.3807	0.4237	1.2551
0.02	0.4428	0.4529	1.2342

2.4 不同浓度活性炭粉末对土壤有效含水量的影响

为进一步探究活性炭粉末对土壤有效含水量的影响,分别以 30,1 500 kPa 基质吸力下土壤含水量作为田间持水量及凋萎系数^[18],以此测算不同活性炭粉末浓度下土壤的有效含水量。由表 4 可知,活性炭粉末的施入会提高土壤的田间持水量,且提升的幅度与活性炭浓度呈正相关,这与活性炭降低土壤容重,增加孔隙度的结果有关。与此同时,小孔隙及表面亲水官能团的吸持使得浓度较高活性炭粉末影

响下土壤的凋萎系数也因此提高,但总的来看,活性炭粉末对于田间持水量的增加量高于凋萎系数,使得土壤有效含水量随活性炭施加浓度增高。同时也可得知,在实际生产运用中,活性炭粉末施用对于土壤吸水性增强所带来的效益高于其持水性增强所带来的效益,这对于农业生产方面的推广具有重要价值。

表 4 不同浓度活性炭施用下土壤有效含水量

活性炭粉末浓度/ (g·g ⁻¹)	田间 持水量/%	凋萎 系数/%	有效 含水量/%
0	33.69	9.24	24.45
0.005	34.02	9.38	24.64
0.01	34.76	9.96	24.80
0.02	37.87	10.25	27.62

2.5 层施活性炭粉末浓度对土壤含水率的影响

由图 4 可知,裸土的质量含水量随土层厚度的增加而增加,在 6—8 cm 层施状态下 0.005 g/g 活性炭粉末用量与裸土相比,各土层的质量含水量差异不大($p>0.05$),且 4—8 cm 土层含水量仍小于 1—4 cm 土层,而 0.01,0.02 g/g 用量组 4—8 cm 土层含水量较裸土分别高 0.07,0.16 g/g。对比 10—12 cm 层施各浓度用量的差异,0.005,0.01,0.02 g/g 用量处理下 8—12 cm 土层的含水量较裸土相比分别高 0.021,0.039,0.070 g/g。16—18 cm 活性炭粉末层施使得裸土对应深度土层含水量较 0.005 g/g 浓度,0.01 g/g 浓度与 0.02 g/g 浓度处理的土层分别少 0.040,0.062,0.108 g/g。在 3 种层施方式中,0.02 g/g 浓度用量对于特定土层的质量含水率提升幅度最高,平均提升 0.112 g/g;0.01 g/g 浓度次之,平均提升 0.057 g/g;0.005 g/g 浓度提升幅度最小,平均为 0.024 g/g。

活性炭粉末粒径细小,孔隙结构发达,表面具有部分亲水基团^[19],这使得层施处理含水量对比其他未处理土层有显著变化,说明土壤中铺设较高浓度的活性炭粉末能够增加土壤的持水能力,并使得其与土壤混合层成为一个高含水量的区域,但经过较长时间(90 min)的水分饱和后,施用活性炭粉浓度的多少对未经处理土层的质量含水量的影响程度较小。

3 讨论

3.1 活性炭粉末施用方式及浓度对入渗速率的影响

土壤入渗过程受供水强度及土壤质地内外 2 个因素的共同影响,由于本文在室内采用定水头法—维土柱模拟试验,故着重讨论后者对土壤入渗的影响。活性炭粉末施入土壤会降低其容重、增加砂粒的含

量,从而改善土壤质地和结构,进而影响土壤水分运动。此外,混施、层施 2 种方式使得原本均质的土体形成层状结构,深刻影响了土层含水率及水力梯度,亦对入渗过程造成影响^[20]。

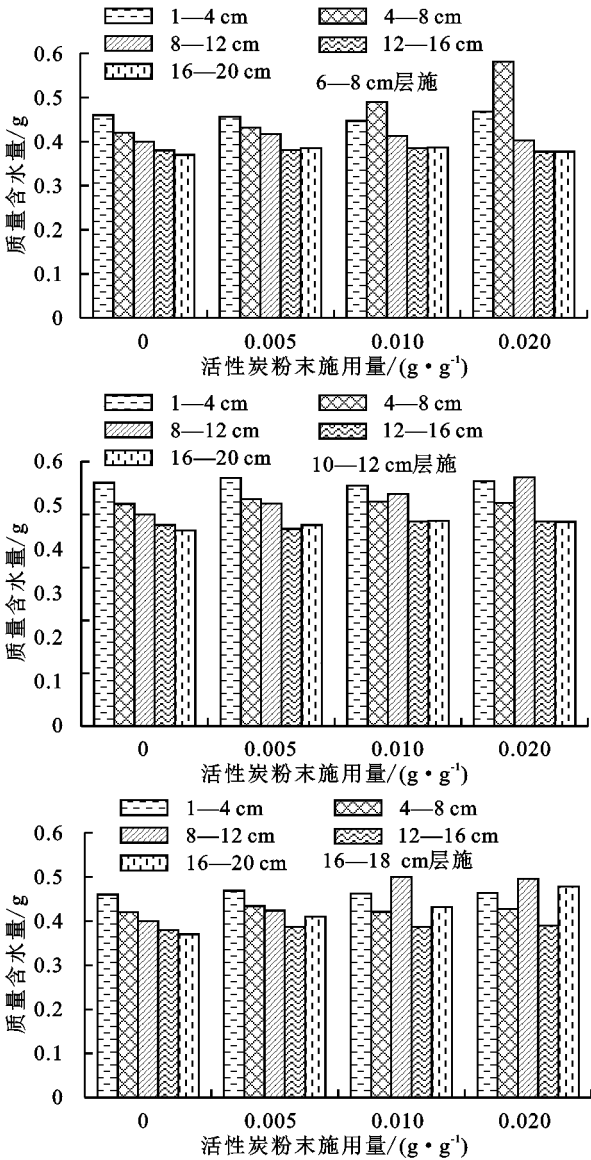


图 4 活性炭粉层施对土壤水分分布影响

活性炭以碳质材料为原料,活化工工艺中形成的多孔性特征使其本身密度较低,施入土壤中使容重降低,改变孔隙数量和结构^[21]。此外,活化过程中孔隙遭到灼烧形成不完整结构,加之活性炭本身含有灰分,在其表面形成羧酸基、羟基等亲水基团,多孔隙结构又赋予其极大的比表面,故表现出一定的亲水特征^[20]。尽管活性炭施入土壤中会降低其容重、增加砂粒的含量,但由于本试验中加入的浓度相对较低(0.5%,1%,2%),故对土壤本身物理性质的影响并不大,活性炭呈现的亲水性、小孔隙对水分子的吸持以及层状结构对水力传导的影响是降低土壤入渗能力的关键所在。

在 0.02 g/g 活性炭粉末施用的 B1、B2 组中,湿润锋在到达土壤与土碳混交层时,第 1 层原土的进水吸力大于土碳混交层的进水吸力,这使得湿润锋在进入土碳混合层时需要一定的累积时间,使得湿润锋的基质吸力不断增加并达到土碳混合层的进水吸力要求。随后湿润锋进入土碳混合层,此时活性炭的亲水性及对水分运移通道造成的曲折在阻碍湿润锋运移方面强于其形成大孔隙对湿润锋运移的促进作用。综上所述湿润锋由第 1 层原土到达交界面并穿过土碳混合层时,湿润锋推移速率下降。湿润锋穿过土碳混层后,到达第 3 层原土,此时土碳混合层对湿润锋入渗的抑制效果减弱,但仍对穿过其的水分运动造成影响,使得湿润锋在第 3 层原土中推进的平均速率介于在第 1 层原土与在第 2 层混合层之间,故表现出湿润锋在第 3 层运移速率的增大趋势,而 B1、B2 组中活性炭 0.005,0.01 g/g 用量浓度相对较低,对入渗的抑制效果不如较高浓度用量明显,故未出现在第 3 层原土中湿润锋斜率增大的趋势。

0.005,0.01,0.02 g/g 活性炭粉末施用的 B3 组也存在湿润锋推移在第 3 土层斜率增大的趋势,这可能是由于土碳混合层设置在 16—18 cm,在抑制湿润锋推移进度的同时,也使得该层土壤含水量较高,满足下层原土的进水吸力要求,在短距离内(18—20 cm)促进湿润锋的推移,使得 0.005,0.01 g/g 较低浓度活性炭粉末的施用亦产生在第 3 层原土中湿润锋斜率增大的趋势。

3.2 活性炭粉末施用的水土保持综合效益有待深入研究

本文设计多组试验欲探究较为合理的活性炭粉末浓度及施用方式,从各组的湿润锋推移情况及累积入渗量来看,活性炭粉末的施用对土壤入渗过程起到了减缓作用。相关研究^[22]表明,喀斯特地区独特的地表、地下二元空间结构使得土壤侵蚀过程经历由地下到地上于地下并行的转变过程。活性炭粉末的施用通过调节入渗速率,在地下水土漏失的阻控方面无疑具有一定的运用价值,但是活性炭粉末对于入渗过程的减缓势必会增加土壤坡面径流的速率,从而加剧对表土层的侵蚀,考虑到土壤表层侵蚀情况又与地质地形、植物分布等外界环境条件有关,提升活性炭粉末施用对于地表与地下二元水土流失防止的综合效果有待进一步研究。

4 结论

活性炭粉末的施用方式及浓度不同,对土壤入渗

的过程及结果产生不同程度的影响。(1)活性炭粉末浓度大小与层施、混施 2 种方式下的土柱湿润锋推移速度呈负相关;相同入渗时间内,0—10 cm 混施和 6—8 cm 层施在各自施用方式中对湿润锋推移的抑制效果最佳。(2)施用较高浓度的活性炭粉末在前期($t=80$ min)能起到较好的入渗抑制效果,但高浓度的碳粉同时会减缓湿润锋推移速度,故最终入渗量($t=340$ min)受其浓度影响较小,且受活性炭粉末理化性质的影响,层状铺设入渗后期呈现斜率增大的趋势。(3)van Genuchten 经验公式及 RETC 软件对土壤入渗的模拟皆表明活性炭粉末施入土壤后,其浓度与土壤吸收水分的能力呈正相关,与土壤释水能力呈负相关。(4)活性炭粉末施用对土壤有效含水量的增加与其浓度呈正相关。(5)活性炭粉末以层施方式放入土壤后能增加对应土层的质量含水量,但其他土层的质量含水量与裸土相比并无太大差距。

参考文献:

- [1] Jain A, Balasubramanian R, Srinivasan M P, et al. Production of high surface area mesoporous activated carbons from waste biomass using hydrogen peroxide-mediated hydrothermal treatment for adsorption applications [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 273: 622-629.
- [2] Jakob L, Hartnik T, Henriksen T, et al. PAH-sequestration capacity of granular and powder activated carbon amendments in soil, and their effects on earthworms and plants [J]. Chemosphere, 2012, 88: 699-705.
- [3] 蒋剑春, 孙康. 活性炭制备技术及应用研究综述 [J]. 林产化学与工业, 2017, 37(1): 1-13.
- [4] 杨林, 陈志明, 刘元鹏, 等. 石灰、活性炭对铬污染土壤的修复效果研究 [J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 518-525.
- [5] 冯汉青, 杜变变, 王庆文, 等. 镉胁迫下活性炭对小麦幼根的保护作用 [J]. 生态学报, 2015, 36(10): 2962-2968.
- [6] 吴媛媛. 添加生物炭对坡面土壤侵蚀的影响研究 [D]. 陕西 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- [7] Oberdörster E. Article Manufactured nanomaterials (Fullerenes, C 60) induce oxidative stress in the Brain of Juvenile Largemouth Bass [J]. Environmental Health Perspectives, 2013, 112(10): 1058-1062.
- [8] 杜薇, 霍璐, 唐雨, 等. 生物炭和活性炭吸附水中典型染料的研究 [J]. 当代化工, 2019, 48(2): 229-234.
- [9] 王丹阳, 李忠武, 陈佳. 中国水土保持区划: 回顾、思考与展望 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 8-17.

[24] Ghafoor A, Poeplau C, Thomas K. Fate of straw-and root-derived carbon in a Swedish agricultural soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*,2017,53(2):257-267.

[25] Burri K, Graf F, Böll A, et al. Revegetation measures improve soil aggregate stability: A case study of a landslide area in Central Switzerland [J]. *Forest Snow and Landscape Research*,2009, 82(1):45-60.

[26] Demenois J, Carriconde F, Bonaventure P, et al. Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferral-sol [J]. *Geoderma*,2018,312(1):6-16.

[27] Carrie A, Haydu H, Robert C, et al. Soil aggregate stability under chaparral species in southern California [J]. *Geoderma*,2018,310:201-208.

[28] Vincent P, Catherine R, Alison D. et al. The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes [J]. *Soil Biology and Biochemis-try*,2018,120:246-259.

[29] Samuel A, Safya M, Claire C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability-A literature analysis [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(1):1-12.

[10] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制[J].*生态学报*,2017,38(2):624-634.

[11] Doan T T, Henry-des-Tureaux T, Rumpel C, et al. Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Viet-nam: A three year mesocosm experiment [J]. *Science of The Total Environment*,2015,514:147-154.

[12] 吴媛媛,杨明义,张凤宝,等.添加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响[J].*土壤学报*,2015,53(1):81-92.

[13] 薛文强,周蓓蓓,毛通,等.纳米碳混合层对土壤水分入渗特性及水分分布影响[J].*水土保持学报*,2018, 32(3):152-159.

[14] 安瞳昕,周锋,吴珍珍,等.坡耕地间作作物群体水土保持耕作措施[J].*水土保持研究*,2019,26(2):17-22.

[15] 刘艳丽,周蓓蓓,王全九,等.纳米碳对黄绵土水分运动及溶质迁移特征的影响[J].*水土保持学报*, 2015,29(1):21-25.

[16] 周蓓蓓,陈晓鹏,吕金榜,等.纳米碳对不同植被覆盖下黄土坡地降雨侵蚀的抑制效果[J].*农业工程学报*, 2017,33(2):116-124.

[17] Boehler M, Zwickenpflug B, Hollender J, et al. Re-moval of micropollutants in municipal waste water treatment plants by powder-activated carbon [J]. *Wa-ter Science & Technology*,2012,66(10):2115-2121.

[18] 白致威,段兴武,丁剑宏,等.土壤有效含水量的经验估 算模型:以黑土为例[J].*中国农学通报*,2015,31(20): 153-159.

[19] 兰亚琼,刘锐,马正杰,等.臭氧—生物活性炭对微污染 原水中典型持久性有机物的去除效果[J].*环境科学*, 2018, 39(12):5541-5549.

[20] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤 水分入渗与蒸发的影响[J].*农业工程学报*,2016,32(14):135-144.

[21] 方圆,冯浩,操信春,等.活性炭对土壤入渗、蒸发特性 及养分淋溶损失的影响[J].*水土保持学报*,2011,25(6):23-26.

[22] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进 展[J]. *水土保持学报*,2018,32(2):1-10.